

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผลการวัดการสังเคราะห์แสงของพืช ด้วยอุปกรณ์ทางแสงขนาดเล็ก

สรายุทธ์ พานเทียน

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณค่าความถี่ของพลังงานแสงที่พืชปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงเมื่อได้รับแสงสีน้ำเงินในสถานะสมนัยโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องขนาดเล็กแบบผสมที่มีลักษณะเป็นโพรงทำจากสารอะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ (AlGaAs) ภายในบรรจุไอออนของธาตุยูโรเพียมในการตรวจวัด แบบจำลองสร้างจากหลักคิดทางควอนตัมซึ่งพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำกับไอออนของธาตุยูโรเพียมแบบขึ้นกับเวลาในสองสถานะ ผลการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ได้แก่ 1. ความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นเมื่ออุปกรณ์อยู่ในโหมดการสั่นพ้อง พบว่า มีการสั่นและค่าลดลงตามเวลา 2. ความถี่ของแสงที่ได้จากปลดปล่อยของพืชจากกระบวนการสังเคราะห์แสง พบว่า อยู่ในช่วงเทราเฮิรตซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการตรวจวัดสเปกตรัมจะมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 33.47 และ 12.33 ตามลำดับ ทั้งนี้ ความถี่ที่ได้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต การส่งสัญญาณชีวิตสิ่งมีชีวิตแบบไร้สาย และระบบเซนเซอร์แบบต่างๆ

คำสำคัญ : สถานะสมนัย, อุปกรณ์ทางแสงแบบไม่เชิงเส้น, ระบบการสังเคราะห์แสง , ความถี่ราบี

Mathematical model for photosynthesis of plants detection probe using micro-optical device

Sarayut Pantian

Department of Physics, Faculty of Science, Thepsatri Rajabhat University

Abstract

Mathematical model of photosynthetic pigment dynamics especially plants using Rabi oscillation mode under nonlinear micro-ring resonator. The Rabi oscillation mode is consequently generated by the photosynthetic pigments and also AlGaAs material interacting with the electromagnetic field in time-domain. The simulation results have shown that the probability to find exciton in the excited state of the device with reducing frequencies at resonance is also calculated. These results are obtained for resonance states. The Rabi frequency and oscillation in the range of terahertz is obtained, in which these results similarly with the results from spectroscopy technique that errors are 33.47 and 12.33 respectively. The range of frequencies are obtained that can be useful for photosynthetic antenna and sensing applications

Keywords : Coherent state, Nonlinear optical device, Photosynthetic light harvesting system, Rabi frequency.

1. บทนำ

การสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตเกี่ยวข้องกับการดูดกลืน การเก็บรักษา และการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงหรืออนุภาค โฟตอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงให้อยู่ในรูปของพลังงานเคมี โดยกระบวนการดังกล่าวเริ่มต้นจากแหล่งกำเนิดแสงปลดปล่อยพลังงานแสงมาตกกระทบกับรงควัตถุสีเขียวของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ คลอโรฟิลล์ จากนั้นคลอโรฟิลล์จะดูดกลืนแสงในช่วงชุดความถี่ค่าหนึ่งและนำพลังงานแสงที่ดูดกลืนไปใช้เร่งอิเล็กตรอนภายในคลอโรฟิลล์ซึ่งเดิมอยู่ในสถานะพื้นให้ไปอยู่ในสถานะกระตุ้นเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและพลังงานไปยังส่วนการสังเคราะห์แสงต่างๆ ท้ายที่สุดจะได้น้ำตาลออกมาในวัฏจักรเคลวิน (Calvin cycle) [1-2] เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นแล้วยอมปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำให้ตัวเองกลับไปอยู่ในสถานะพื้น โดยพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาสามารถตรวจวัดได้ในรูปของสเปกตรัม เราเรียกการตรวจวัดลักษณะนี้ว่า “เทคนิคการตรวจวัดสเปกตรัม (Spectroscopy technique)”

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตที่ได้รับความนิยม ได้แก่ แบบจำลองสารประกอบโปรตีนของเฟнна-แมทเธวส์-โอลสัน (The Fenna-Matthews-Olson model, FMO) โดยแบบจำลองนี้แสดงถึงการถ่ายโอนพลังงานและอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้น (Excitation energy transfers, EET) ภายในคลอโรฟิลล์ [3-7] งานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนมากสนใจการสังเคราะห์แสงของแบคทีเรียบางชนิดในสถานะสมนัย (coherent state) [8-12] ที่มีการควบคุมสภาวะทางกายภาพเนื่องจากแบคทีเรียมีชีวิตระหว่างทดลองจริง จึงเป็นเหตุให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองเกี่ยวกับการสังเคราะห์แสงของพืชยังมีน้อยมาก ผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของแบคทีเรียมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ ค่าความถี่ที่แบคทีเรียปลดปล่อยออกมาอยู่ในช่วงเทราเฮิรตซ์ [13]

อุปกรณ์ทางแสง (Optical device) คือ อุปกรณ์ที่ใช้แสงเป็นตัวการรับและส่งข้อมูล รวมถึงการสร้างและตรวจวัดข้อมูลต่างๆ ด้วยปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ ปัจจุบันอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถสร้างให้มีขนาดเล็กมากในระดับ

ไมโครเมตรทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้นอยู่กับปัจจัยที่หลากหลาย อาทิเช่น การออกแบบวงจรของอุปกรณ์และวัสดุที่ใช้สร้าง ฯลฯ ด้วยเหตุนี้ ทำให้อุปกรณ์แสงเป็นอุปกรณ์แห่งอนาคตที่มีแนวโน้มนำมาใช้ในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น [14-18] วงจรอุปกรณ์ทางแสงชนิดหนึ่งที่สามารถรองรับหรือแปลงสัญญาณความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้ได้ตามที่เรากำลังต้องการ คือ วงแหวนสั่นพ้อง (ring resonator) ที่ผลิตจากท่อนำคลื่น (waveguide) จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า หากเราใช้วัสดุที่ทำจากสารไม่เชิงเส้นจะทำให้ได้ความถี่ของสัญญาณที่หลากหลายกว่าสารแบบเชิงเส้น [19-21] ในกรณีที่ท่อนำคลื่นเป็นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular waveguide) ที่มีการบรรจุไอออนของธาตุลงไปเราสามารถทำให้ไอออนของธาตุนั้นอยู่ในสถานะกระตุ้นได้ด้วยการให้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เท่ากับความถี่ราบี (Rabi frequency) เพื่อให้อะตอมของไอออนอยู่ในสถานะกระตุ้นพอดี [22] จากนั้น ทำการตรวจวัดสัญญาณการสั่นของไอออนที่ได้ ณ ตำแหน่งทางออกของท่อนำคลื่น

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงให้ความสนใจในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณค่าความถี่ของพลังงานแสงที่พืชปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงในสถานะสมนัยโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องขนาดเล็กแบบผสมที่สร้างจากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากทำจากสารอะลูมิเนียมเทลลูไรด์ในท่อนำคลื่นบรรจุไอออนของธาตุยูโรเพียมในการตรวจวัด ทั้งนี้ ผลการวิจัยออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการพบไอออนของธาตุยูโรเพียมในสถานะกระตุ้น 2. ผลการคำนวณค่าความถี่ที่ได้จากการปลดปล่อยของพืชจากกระบวนการสังเคราะห์แสง เพื่อเรียนรู้พฤติกรรมของการสังเคราะห์แสงของพืชแต่ละชนิดซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลของผลผลิตของพืช

2. ทฤษฎีและหลักการทำงานของอุปกรณ์

แบบจำลองอย่างง่ายการถ่ายโอนพลังงานและอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นของสารประกอบโปรตีนจำนวน N ตัว ที่อยู่ภายในคลอโรฟิลล์ โดยกำหนดให้แต่ละตัวมีการเปลี่ยนแปลงได้เพียงสองสถานะจากสถานะพื้น, s_0 ไปยัง

สถานะกระตุ้น, S_1 เมื่อถูกกระทำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การวัดพลังงานที่สารประกอบโปรตีนปลดปล่อยออกมา เพื่อที่จะกลับเข้าสู่สถานะพื้น หรือ พลังงานผ่อนคลาย (Relaxation energy) นั้นสามารถหาได้จากการสร้างตัวดำเนินการแฮมิลโทเนียนรวมที่ประกอบไปด้วยสามส่วน คือ 1. ส่วนของอะตอมสารประกอบโปรตีนที่ถูกกระตุ้น, H_{ex} 2. ส่วนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้ามากระทำกับสารประกอบโปรตีน, H_{rad} 3. ส่วนของการทำปฏิกิริยากันระหว่างอะตอมสารประกอบโปรตีนกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, H_{ex-rad} ดังสมการ

$$H_{tot} = H_{ex} + H_{rad} + H_{ex-rad} \quad (1)$$

โดยที่รายละเอียดของแต่ละส่วนเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$H_{ex} = \sum_{j=1}^N |j\rangle \epsilon_j \langle j| + \sum_{k \neq j} |j\rangle J_{jk} \langle k| \quad (2)$$

เมื่อ $|j\rangle$ คือ สถานะของสารประกอบโปรตีนตัวที่ j ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ส่วนสารประกอบโปรตีนตัวอื่นๆ กำหนดให้อยู่ในสถานะพื้น ϵ_j คือ พลังงานที่พอติดการเปลี่ยนสถานะหรืออยู่ในสถานะสมนัยพอดี โดยในงานวิจัยนี้ กำหนดให้พลังงานที่ให้กับอะตอมสารประกอบโปรตีนกับพลังงานผ่อนคลายมีค่าเท่ากัน J_{jk} คือ สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างอะตอมของสารประกอบโปรตีนตัวที่ j กับสารประกอบโปรตีนตัวที่ k โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้สัมประสิทธิ์นี้เป็นค่าคงที่

$$H_{rad} = \hbar \omega a^\dagger a \quad (3)$$

เมื่อ a และ $a^\dagger$ คือ ตัวดำเนินการสร้างและทำลายพลังงานของอนุภาคโฟตอนที่เข้ามากระทำกับสารประกอบโปรตีน ตามลำดับ

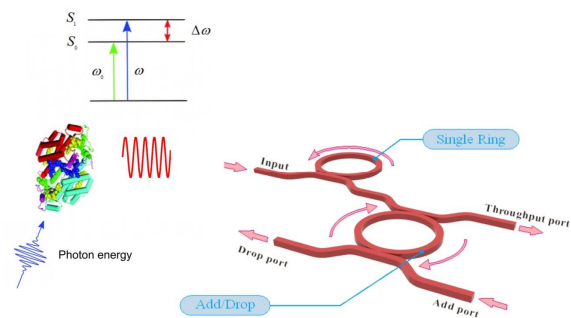
$$H_{ex-rad} = -d \cdot \tilde{E}(t) \quad (4)$$

เมื่อ d คือ ตัวดำเนินการโมเมนต์คู่ควบทางไฟฟ้า (Electric dipole moment operator) ที่เกิดจากอะตอมสารประกอบโปรตีนกระทำกับสนามไฟฟ้า $\tilde{E}(t)$ ในการคำนวณผู้วิจัยได้ทำการประมาณค่าผลของปฏิกิริยาด้วยวิธีการประมาณค่าคู่ควบ (Dipole approximation)

กลุ่มพลังงานในการเปลี่ยนสถานะของสารประกอบโปรตีนจำนวน N ตัว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์กำหนดให้เป็นตัวแปร ρ เราสามารถหาพลวัต (dynamic) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกลุ่มพลังงานได้จากการประยุกต์สมการของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg equation) ดังสมการ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} [H_{tot}, \rho] \quad (5)$$

วงจรอุปกรณ์ทางแสงที่ออกแบบมาเพื่อตรวจวัดการปลดปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นไปตามรูปที่ 1. ซึ่งเริ่มต้นจากแหล่งกำเนิดแสงปลดปล่อยโฟตอนมากระทบกับสารประกอบโปรตีน จากนั้นสารประกอบโปรตีนจึงเปลี่ยนสถานะไปเป็นสถานะกระตุ้นด้วยความถี่ราบีและคายพลังงานออกมาในโหมดการสั่นพ้อง



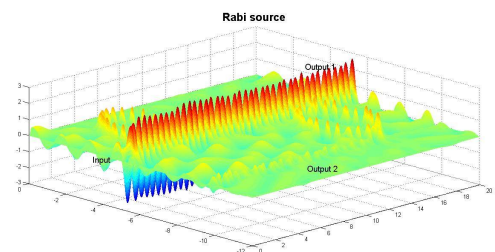
รูปที่ 1 แสดงระบบการตรวจวัดค่าความถี่พลังงานที่สารประกอบโปรตีนปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสง

พลังงานที่คายออกมาจะถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้หลักการทำงานของวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม [22] ซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับการกระตุ้นสารประกอบโปรตีน กล่าวคือ พลังงานที่สารประกอบโปรตีนปลดปล่อยออกมาจะไปกระตุ้นไอออนของธาตุยูโรเปียมที่อยู่ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากให้เกิดการเปลี่ยนสถานะหรือเกิดการสั่น จากนั้นไอออนจะปลดปล่อยพลังงานที่มีค่าความถี่ค่าหนึ่งเดินทางไปยังทางออกของท่อนำคลื่น จากการออกแบบวงจรท่อนำคลื่นจะทำให้เกิดการสั่นพ้องของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดการกรองสัญญาณความถี่ที่เราสามารถนำไปขยายความและประยุกต์ใช้ได้

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

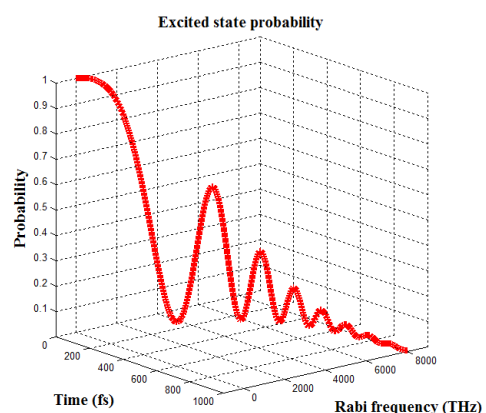
แบบจำลองอุปกรณ์ทางแสงที่ผู้วิจัยจากอุปกรณ์ที่สามารถสร้างได้จากงานวิจัยอ้างอิงต่างๆ โดยหลักการทำงานภายในวงแหวนสั่นพ้องจะเป็นไปตามรูปที่ 2. ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการสั่นนำสัญญาณเข้าที่ตำแหน่งขาเข้า (Input) และมีสัญญาณออกได้ 2 ทาง คือ ทางออกที่ 1 (Output 1) และทางออกที่ 2 (Output2) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานว่าจะเลือกใช้งานสัญญาณทางออกใด งานวิจัยนี้ใช้ความถี่ช่วงแสงสีน้ำเงินในการกระตุ้นสารประกอบโปรตีนให้เกิดการสังเคราะห์แสง ในส่วนของท่อนำคลื่นสร้างจากสารอะลูมิเนียม-เทลลูไรด์อาร์เซไนต์ การคำนวณผู้วิจัยกำหนดค่ารัศมีของวงแหวนสั่นพ้องทั้งสองให้มีขนาด 5 ไมโครเมตร ความยาวของท่อนำคลื่น 10 ไมโครเมตร ดัชนีหักเหเชิงเส้นเท่ากับ 3.34 ค่าคงที่การดูดกลืนสองโฟตอน (two photon absorption constant) เท่ากับ 0.5 เซนติเมตรต่อจิกกะวัตต์ สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน (linear loss coefficient) เท่ากับ 5 เดซิเบลต่อเซนติเมตร ช่วงอายุของพาหะอิสระ (free carrier life time) เท่ากับ 1 นาโนวินาที ดัชนีหักเหแบบไม่เชิงเส้นเท่ากับ 1.5×10^{-4} ตารางเซนติเมตรต่อจิกกะวัตต์ สัมประสิทธิ์การคัปปลิง (coupling coefficient) ทุกตำแหน่งเท่ากับ 0.2 [22] การ

คำนวณทั้งหมดผู้วิจัยใช้โปรแกรม MATLAB ทั้งนี้ การคำนวณใช้สมการที่ (5) อธิบายพฤติกรรมการสังเคราะห์แสงของพืช และการสั่นของวัสดุที่ใช้ทำท่อนำคลื่น

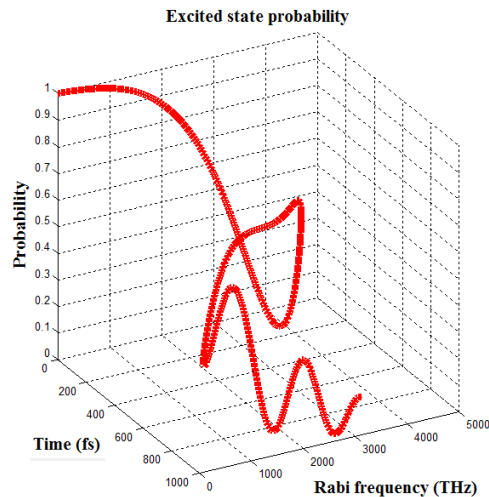


รูปที่ 2 แสดงการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวงแหวนสั่นพ้องแบบผสม

รูปที่ 3 และ 4 แสดงให้เห็นถึงค่าความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นและค่าความถี่ราบี จะเห็นว่าความถี่ที่อุปกรณ์ทางแสงตรวจวัดได้นั้นอยู่ในช่วงเทราเฮิร์ตซ์ โดยสัญญาณทางออกที่ 1 จะมีความเป็นระเบียบมากกว่าทางออกที่ 2 โดยผลการวิจัยของ Ishizaki และคณะ [13] ที่ทำการตรวจวัดการสังเคราะห์แสงของแบคทีเรียด้วยวิธีการเทคนิคการตรวจวัดสเปกตรัมให้ผลในแนวทางเดียวกันกับทางออกที่ 2 โดยค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นในแต่ละช่วงเวลารวมระหว่างวิธีที่ผู้วิจัยออกแบบและของ Ishizaki เท่ากับร้อยละ 33.47 ทั้งนี้ เนื่องจากการสมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองได้จากการประมาณค่าในหลายส่วน

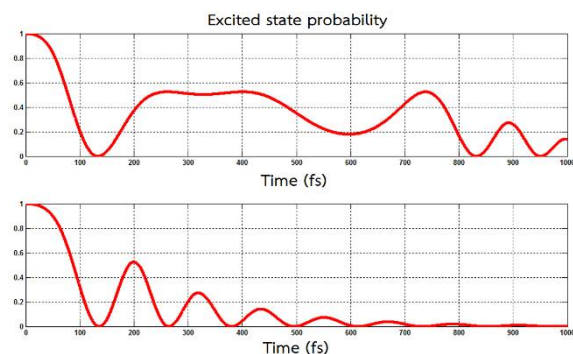


รูปที่ 3 แสดงค่าความน่าจะเป็นและความถี่ราบีในแต่ละช่วงเวลาที่สามารถคำนวณได้ในทางออกที่ 2



รูปที่ 4 แสดงค่าความน่าจะเป็นและความถี่ราบิในแต่ละช่วงเวลาที่สามารถคำนวณได้ในทางออกที่ 1

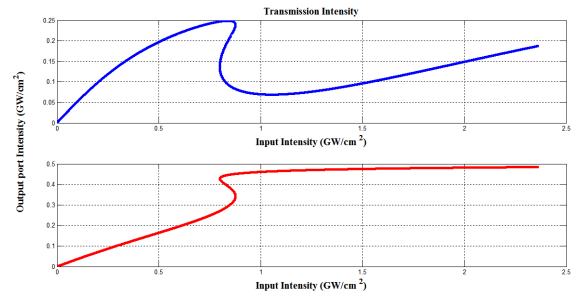
รูปที่ 5 แสดงความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นที่วิวัฒนาการตามเวลา พบว่า เวลาผ่อนคลายหรือเวลาที่ใช้ในการคายพลังงานออกเพื่อกลับมายังสถานะพื้นของสารประกอบโปรตีนอยู่ในช่วงเฟมโตวินาทีทั้งสองช่องทางออก เมื่อเทียบกับผลการทดลองของ Rozzi และคณะ [24] ที่ทำการทดลองหาเวลาผ่อนคลายของแบคทีเรียที่ได้รับการกระตุ้นจากแสงสีน้ำเงินให้เกิดการสังเคราะห์แสงมีแนวโน้มใกล้เคียงกับสัญญาณทางออกที่ 2 โดยค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นรวมในแต่ละช่วงเวลาระหว่างวิธีที่ผู้วิจัยออกแบบและของ Rozzi เท่ากับร้อยละ 12.33



รูปที่ 5 แสดงความน่าจะเป็นเทียบกับเวลาของช่องสัญญาณทางออกที่ 1 (ภาพบน) และทางออกที่ 2 (ภาพล่าง)

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นสมบัติเชิงเส้นของความเข้มสัญญาณขาเข้ากับสัญญาณขาออก พบว่า ทั้งสองทางออกให้

สมบัติเชิงเส้นในช่วงที่แตกต่างกัน ทั้งยังมีบางช่วงที่แสดงสมบัติเชิงเส้นแบบฮิสเทรีซิส (Bistability) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเลือกช่วงความเข้มสัญญาณไปใช้งาน หรือใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มแสงที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของพืชอีกด้วย



รูปที่ 6 แสดงสมบัติเชิงเส้นแบบฮิสเทรีซิสของสัญญาณช่องทางออกที่ 1 (ภาพบน) และทางออกที่ 2 (ภาพล่าง)

4. สรุปผล

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างสมการวัดการสังเคราะห์แสงของพืชด้วยอุปกรณ์ทางแสงขนาดเล็กซึ่งทั้งสารประกอบโปรตีนและไอออนที่อยู่ภายในท่อนำคลื่นใช้หลักการพิจารณาเดียวกัน กล่าวคือ ให้อะตอมเดิมอยู่ในสถานะพื้นและถูกกระตุ้นด้วยความถี่ราบิให้ไปอยู่ในสถานะกระตุ้นพอดี จากนั้นคิดการคายพลังงานในโหมดการสั่นพ้องหรือพลังงานที่รับเข้าเท่ากับพลังงานที่คายออกมา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะพิจารณาเฉพาะแรงคู่ลอมบ์ที่เกิดขึ้นภายในอะตอมโดยไม่พิจารณาผลจากการสั่นหรือโฟนอน ผลที่ได้จากการคำนวณพบว่าทั้งส่วนของค่าความถี่ราบิและความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นมีแนวโน้มเดียวกันกับงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการตรวจวัดสเปกตรัมในช่องทางออกที่ 2 แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นในแต่ละช่วงเวลายังมีค่ามากอันเนื่องมาจากการประมาณค่าในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยจากกระบวนการสังเคราะห์แสงที่เราสามารถนำมาสร้างคลื่นสัญญาณที่ใช้งานในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ด้วยเหตุที่มีความถี่อยู่ในช่วงเทราเฮิรตซ์ หรือการส่งสัญญาณชีวิตสิ่งมีชีวิตแบบไร้สายและระบบเซนเซอร์แบบต่างๆ ได้อีกด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hall, D. O. and Rao, K.K., "Photosynthesis," 6th edn, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1999.
- [2] Blankenship. R. E., "Molecular mechanisms of photosynthesis," Oxford, UK, Blackwell Science, 2002.
- [3] Fassioli F et al, "Photosynthetic light harvesting: excitons and coherence," J. R. Soc. Interface, Vol 11: 20130901, 2013.
- [4] Lim J et al, "Vibronic origin of long-lived coherence in an artificial molecular light harvesting," Nature Communications, Vol 6: 7755, 2015.
- [5] Ranger T et al, "How the molecular structure determines the flow of excitation energy in plant light-harvesting complex II," Journal of Plant Physiology, Vol 168, pp. 1497-1509, 2011.
- [6] Tessa R. Calhoun and Graham R. Fleming, "Quantum coherence in photosynthetic complexes," Phy. Status Solidi B, Vol 248, No.4, pp. 833-838, 2011.
- [7] Jahan M. Dawlaty et al, "Microscopic quantum coherence in a photosynthetic light harvesting antenna," Phil. Trans. R. Soc. A, Vol 370, pp. 3672-3691, 2012.
- [8] Duan H G et al, "Two-dimensional electronic spectroscopy of light-harvesting complex II at ambient temperature: a joint experimental and theoretical study," J. Phys. Chem. B, 2015.
- [9] Lewis N H et al, "A method for the direct measurement of electronic site populations in a molecular aggregate using two-dimensional electronic vibrational spectroscopy," J. Phys. Chem. B, 2015.
- [10] Oliver T A, Lewis N H and Fleming G R, "Correlating the motion of electrons and nuclei with two-dimensional electronic vibrational spectroscopy," Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A, 111, pp. 10061-10066, 2014.
- [11] ong H et al, "Determining the static electronic and vibrational energy correlations via two-dimensional electronic vibrational spectroscopy," J. Chem. Phys, 2015.
- [12] Lewis N. et al, "Measuring correlated electronic and vibrational spectral dynamics using line shapes in two-dimensional electronic vibrational spectroscopy," J. Chem. Phys, 2015.
- [13] Ishizaki A and Fleming G R, "Theoretical examination of quantum coherence in a photosynthetic system at physiological temperature," PNAS, Vol 106, No. 41, pp. 17255-17260, 2009.
- [14] Ibrahim T A, Grover R, Kuo L C, Kanakaraju S, Calhoun L C, and Ho P T, "All-optical AND/NAND logic gates using semiconductor Microresonators," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, pp. 1422-1424, 2003.
- [15] Chao C Y, Fung W, and Guo L J, "Polymer microring resonators for biochemical sensing applications," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 12, pp. 134-142, 2006.
- [16] Forst M, Niehusmann J, Plotzing T, Bolten J, Wahlbrink T, Moormann C and Kurz H, "High-speed all-optical switching in ionimplanted silicon-on-insulator microring resonators," Optics Letters, Vol. 32, pp. 2046-2048, 2007.
- [17] Yupapin P and N Pornsuwancharoen, "Proposed nonlinear microring resonator arrangement for stopping and storing light," IEEE Photonics Technology Letters, Vol.21, pp. 404-406, 2009.

- [18] Thammawongsa N, S Tunsiri, M A Jalil, J Ali and P Yupapin, "Storing and harvesting atoms/molecules On-Chip: Challenges and Applications," J. Biosensors & Bioelectronics, Vol.3, pp. 14-115, 2012.
- [19] Zainol F D, N Thammawongsa, S Mitatha, J Ali, P Yupapin, "Nerve communication model by bio-cells and optical dipole coupling effects, Artificial Cells," Nanomedicine, and Biotechnology, pp. 1-8, 2013.
- [20] Sarapat N, K. Kulsirirat and P Yupapin, "Tissue culture with 3D monitoring by distributed ring circuits," Journal of Biosensors and Bioelectronics, Vol. 4(2), pp. 9-22, 2013.
- [21] Khunnam W, N Yongram, N Sarapat, P Yupapin, "Quantum matter generated by trapped particles," ScienceJet, Vol 2, pp. 37-39, 2013.
- [22] Yupapin P, Pantian S and Ali J, Novel design Rabi oscillation system for human quantum life detection probe, Life Sci J, 11(2), pp. 235-243, 2014.
- [23] Zyga L, "Study supports role of quantum effects in photosynthesis," The Journal of Physical Chemistry Letters, Vol.3, pp. 272-277, 2012.
- [24] Rozzi C A et al, "Quantum coherence controls the charge separation in a prototypical artificial light harvesting system," Nature communication, 2013.